

文章编号:1674-2974(2016)02-0150-07

一种新的认知无线电宽带盲频谱感知方法^{*}

雷可君^{1,2}, 谭阳红¹, 杨喜^{3†}, 文娟¹

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 吉首大学 信息科学与工程学院, 湖南 吉首 416000; 3. 东南大学 信息科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:基于信息论准则的宽带频谱感知方法由于很好地克服了噪声不确定性问题而获得了广泛研究. 但该类算法的推导需要假定接收数据向量在统计上独立同分布、背景噪声须为高斯白噪声, 且其实现复杂度较高. 针对这些不足, 本文提出一种基于秩准则的宽带盲频谱感知算法. 该算法将接收信号的取样协方差矩阵分解成秩为 q 的“理想”矩阵和“扰动”矩阵之和, 利用秩准则函数寻求 q 值的最优解, 然后根据该最优值确定被占用信道的个数及位置. 新方法无需依赖噪声功率、信道及主用户信号的统计特征参与感知判决过程, 具有广泛的适用性; 同时相对于基于信息论准则的宽带频谱感知方法, 新方法具有感知判决量表达式简单、计算复杂度低的优点, 同时新方法在色噪声场景下表现出优良的感知性能. 仿真结果表明了新方法的有效性.

关键词:认知无线电; 宽带盲频谱感知; 秩准则; 信号子空间; 噪声子空间

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

A New Method of Wideband Blind Spectrum Sensing for Cognitive Radio

LEI Ke-jun^{1,2}, TAN Yang-hong¹, YANG Xi^{3†}, WEN Juan¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China;
2. College of Information Science and Engineering, Jishou Univ, Jishou, Hunan 416000, China;
3. School of Information Science and Engineering, Southeast Univ, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: Wideband spectrum sensing methods based on information theory criterion (ITC) solve the problem of noise uncertainty, so it has been extensively studied. But deducing the sensing decision rule using the information theory needs to assume that the received data vectors are statistical independent, and that the noise is Gaussian white noise. Meanwhile, this kind of methods possesses high implementation complexity. To overcome these limitations, this paper presented a new wideband blind spectrum sensing method based on the rank criterion. This proposed method firstly divides the sample covariance matrix of received signal into the “ideal” matrix having rank of q and the “disturbance” matrix, the rank criterion function is then used to search the optimal q value, which is used to determine the numbers and the loca-

^{*} 收稿日期: 2015-06-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61362018, 61102039, 61102089), National Natural Science Foundation of China(61362018, 61102039, 61102089); 湖南省自然科学基金资助项目(14JJ7029); 湖南省教育厅优秀青年项目(13B093); 湖南省科技计划项目(2015GK3032); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目; 江苏省博士后科研资助计划项目(1402041B)

作者简介:雷可君(1979-), 女, 湖南永州人, 湖南大学博士研究生

[†] 通讯联系人, E-mail: ynkej@163.com

tions of the occupied channels. The new method requires no a priori knowledge about the noise power, the statistical characteristics of the wireless channel and the primary user signal. Compared with the existing ITC based wideband sensing methods, the proposed method has a more concise decision expression and then has lower computational complexity. In addition, the new method shows excellent performance in colored noise sensing scenarios. Simulation results verified the effectiveness of the proposed method.

Key words: cognitive radio; wideband blind spectrum sensing; rank criterion; signal subspace; noise subspace

日益增长的频谱需求和有限的频谱资源之间的矛盾,成为制约无线通信发展的重要因素之一.根据美国联邦通信委员会的调查报告,授权频段的利用率在15%到85%之间波动.这意味着很多授权频段在不同的时间和空间上并未被充分利用,因而形成了大量的频谱空洞.在频谱需求日益增大的今天,合理利用这些频谱空洞,势必极大地缓解当前频谱资源紧张的问题.

认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术是一种有效利用频谱空洞的新技术,其允许非授权用户在授权用户未使用其合法频段(即频谱空洞存在)的前提下使用该频段,从而极大地提高了频谱利用效率.该技术在工业界和学术界已经成为一项重要的研究课题^[1].实现CR技术的一个关键在于迅速感知频谱空洞,并且一旦授权用户重新使用授权频段(频谱空洞消失),非授权用户必须马上停止使用,以免对授权用户产生干扰.

目前比较成熟的频谱感知算法主要包括匹配滤波器法、能量检测法、循环平稳特征检测法和特征值检测法,以及在此基础上发展起来的各类协作式频谱感知算法^[2-4].这些窄带频谱感知算法可在时域或频域实现,各有优缺点.考虑到频谱感知的效率,近年来宽带频谱感知逐渐成为新的研究热点.文献[5]提出基于小波算法的宽带频谱感知技术,根据不同频段功率谱密度不同而对信道进行检测,但该算法性能不稳定,受噪声影响较大.文献[6]将凸优化算法引入宽带频谱感知中,取得了较好的效果,但由于现实中感知场景多为非凸的,求解时须将非凸域转化为凸域,这增加了计算复杂度,也降低了检测准确度.文献[7]和[8]建立了基于信息论准则(Information Theory Criterion, ITC)的宽带频谱感知方法,该类算法无需依赖于噪声功率信息,解决了感知过程中遭遇的噪声不确定性问题,较好地克服了上述宽带感知算法的缺点,具有很好的研究价值.然而基于ITC的宽带频谱感知理论在本质上需要假定

接收数据向量在统计上独立同分布、背景噪声须为高斯白噪声^[7-10],且其感知判决量表达式复杂,导致实现复杂度较高,不能满足时限性感知应用场景的需要^[11].针对基于ITC宽带感知方法的不足,本文提出一种新的基于秩准则的宽带频谱感知方法,其在感知判决过程中无需依赖于噪声功率、信道及主用户信号的统计特征,且在色噪声场景下具有较好的鲁棒性,是一种具有广泛应用前景的盲感知算法.与此同时,该方法对应的感知判决量具有简洁的表达式,其实现复杂度低.

1 宽带频谱感知系统模型

假定被研究的频谱其频带范围为 f_s 到 f_t ,每个子带的带宽均为 W ,则整个频带划分为 $Q=(f_t-f_s)/W$ 个信道,其中第 q 个信道所占用的频谱范围从 $f_s+(q-1)W$ 到 f_s+qW .所有信道分为被占用信道和空闲信道两类,这里用 $R=\{1, 2, \dots, Q\}$ 表示所有信道的集合, $R_1=\{q_1, q_2, \dots, q_k\}$ 表示被占用信道的集合, $R_0=R-R_1$ 表示空闲信道的集合.信道占用情况的模型如图1所示,其中白色的长方体表示未占用信道,灰色的长方体表示已占用信道.

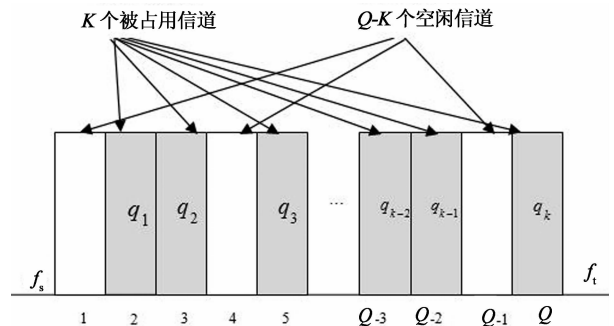


图1 信道占用情况模型图

Fig.1 Channel occupancy model

假定在第 q 个信道中,在第 n 时刻授权信号经信道传输后的抽样为 $s_q(n)$,噪声经抽样后为 $\epsilon_q(n)$,则感知节点接收到的信号可由式(1)表示.

$$y_q(n) = s_q(n) + \varepsilon_q(n),$$

$$q = 1, 2, \dots, Q; n = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

为保证信息论准则的适用场景^[7-8],假定 $s_q(n)$ 服从均值为零、方差为 σ_q^2 的高斯分布, $\varepsilon_q(n)$ 是均值为零、方差为 σ^2 的高斯白噪声. 且当 $q_i \neq q_j$ 时, $y_{q_i}(n)$ 与 $y_{q_j}(n)$, $s_{q_i}(n)$ 与 $s_{q_j}(n)$, $\varepsilon_{q_i}(n)$ 与 $\varepsilon_{q_j}(n)$ 分别独立; 当 $n_1 \neq n_2$ 时, $y_q(n_1)$ 与 $y_q(n_2)$, $s_q(n_1)$ 与 $s_q(n_2)$, $\varepsilon_q(n_1)$ 与 $\varepsilon_q(n_2)$ 分别独立. 为处理的方便, 分别将 Q 个信道中传输的噪声信号、主信号以及接收端信号分别写成向量形式: $\varepsilon(n) = [\varepsilon_1(n), \varepsilon_2(n), \dots, \varepsilon_Q(n)]^T$, $s(n) = [s_1(n), s_2(n), \dots, s_Q(n)]^T$ 和 $y(n) = [y_1(n), y_2(n), \dots, y_Q(n)]^T$, 则有:

$$y(n) = s(n) + \varepsilon(n). \quad (2)$$

根据以上定义, 可求得接收信号 $y(n)$ 的协方差矩阵为一个对角阵:

$$\Phi = E[y(n)y(n)^H] = \begin{bmatrix} \Phi_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Phi_2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \Phi_q & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \Phi_Q \end{bmatrix}. \quad (3)$$

在噪声一致的情况下, $\varepsilon_1(n), \varepsilon_2(n), \dots, \varepsilon_q(n)$ 的方差均为 σ^2 , 则可得:

$$\Phi_q = \begin{cases} \sigma_q^2 + \sigma^2, & \text{如果信道被占用, 即 } q \in R_1; \\ \sigma^2, & \text{如果信道未占用, 即 } q \in R_0. \end{cases} \quad (4)$$

$$q = 1, 2, \dots, Q.$$

在实际的感知应用场景中, 感知判决中心往往缺乏接收信号的统计特征, 因此很难根据式(3)求得统计协方差矩阵 Φ . 故在实际处理过程中通常用取样协方差矩阵 $\tilde{\Phi}$ 来估计 Φ , 即有

$$\Phi = \lim_{N \rightarrow \infty} \tilde{\Phi} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y(n)y(n)^H. \quad (5)$$

通过分析频谱感知中频谱空洞产生的原因, 并结合上述建立的宽带感知数据模型, 可以将频谱空洞的检测问题转化为求解取样协方差矩阵中对角元素值为 σ^2 的元素个数, 由此来确定未占用频段的个数.

2 基于 ITC 的宽带频谱感知算法

为便于分析, 下面拟对基于 ITC 的宽带频谱感

知算法作简单的描述. 其具体包括基于 Akaike 信息论准则 (Akaike's Information Criterion, AIC) 和基于最小长度描述准则 (Minimum Description Length, MDL) 两类算法, 其差别在于判决量中惩罚项的定义有所不同^[7-8].

在宽带频谱感知中, 假定被占用信道数为 j , 并对被占用信道中主用户信号的方差按降序排列处理表示为 $\{\sigma_1^2 \geq \sigma_2^2 \geq \dots \geq \sigma_j^2\} = \text{dsort}\{\sigma_{q_1}^2, \sigma_{q_2}^2, \dots, \sigma_{q_j}^2\}$. 根据矩阵特征值分解理论, 则有:

$$H_j : E[y(n)y(n)^H] \cong \Phi_j = \sum_{i=1}^j \sigma_i^2 u_i u_i^H + \sigma^2 \mathbf{I}. \quad (6)$$

式中: $j = 1, 2, \dots, Q; u_i$ 为协方差矩阵 $E[s(n)s(n)^H]$ 的特征值 σ_i^2 所对应的特征向量.

根据以上假设, 文献[7]给出在宽带频谱感知场景下 AIC 和 MDL 算法的如下定义:

$$\text{AIC}_j = -2 \log f(Y | \hat{\Phi}_j) + 2\varphi = -2N \log \left\{ \frac{\prod_{i=j+1}^Q \rho_i}{\left(\left(\frac{1}{(Q-j)} \right) \sum_{i=j+1}^Q \rho_i \right)^{\langle Q-j \rangle}} \right\} + 2j(2Q-j).$$

$$\text{MDL}_j = -\log f(Y | \hat{\Phi}_j) + \frac{1}{2} \varphi \log N = -N \log \left\{ \frac{\prod_{i=j+1}^Q \rho_i}{\left(\left(\frac{1}{(Q-j)} \right) \sum_{i=j+1}^Q \rho_i \right)^{\langle Q-j \rangle}} \right\} + \frac{1}{2} j(2Q-j) \log N. \quad (8)$$

式中: φ 是信息论准则的罚函数; $\hat{\Phi}_j$ 是协方差矩阵 Φ_j 的最大似然估计; $\rho_1 \geq \rho_2 \geq \dots \geq \rho_Q$ 是取样协方差矩阵 $\tilde{\Phi}$ 的特征值, 而函数

$$f(Y | \hat{\Phi}_j) = f(y(1), y(2), \dots, y(N) | \hat{\Phi}_j) = \prod_{n=1}^N f(y(n) | \hat{\Phi}_j) \quad (9)$$

表示条件概率密度函数.

根据信息论准则思想, 求解取样协方差矩阵 $\tilde{\Phi}$ 中对角元素值为 σ^2 的元素个数转化为求解式(7)和式(8)的最小值所对应的 j , 即

$$\hat{K} = \arg \min_{j=0,1,\dots,Q-1} \text{AIC}_j, \quad (10)$$

或者

$$\hat{K} = \arg \min_{j=0,1,\dots,Q-1} \text{MDL}_j. \quad (11)$$

在求得被占用信道数 j 后, 将取样协方差矩阵

$\tilde{\Phi}$ 的对角线元素进行降序排列,其中 j 个较大值所对应的信道即为被占用信道,而其余的 $Q-j$ 个信道则为空闲信道,即频谱空洞。

3 基于秩准则的宽带频谱感知算法

3.1 秩准则算法的理论依据

从公式(3)和(9)可以看出,基于 ITC 的宽带频谱感知算法在推导过程中,假定信道噪声是高斯白噪声,且相继的接收数据向量是统计不相关的。这与现实场景中白噪声经信道传输后受信道脉冲响应尾部影响而变成色噪声,以及感知节点处相继接收数据向量往往是相关的这一实际情况并不相符。

为了克服基于 ITC 的宽带频谱感知算法的局限性,本文将用于信道阶数估计的秩准则^[9]判决思想引入到宽带频谱感知问题。基于秩准则的宽带频谱感知方法采用子空间分解的思想,根据接收信号协方差矩阵特征值相对应的特征向量,张成彼此正交的“估计”空闲信道子空间和“估计”被占用信道子空间,并引入扰动矩阵生成“扰动”被占用信道子空间,通过测量“估计”被占用信道子空间和“扰动”被占用信道子空间的距离来进行被占用信道数量的最优估计,进而确定被占用信道的位置。

基于秩准则的宽带频谱感知算法,首先要将取样协方差矩阵 $\tilde{\Phi}$ 分解成秩为 q 的“理想”矩阵 Φ_{ideal} 和“扰动”矩阵 E 之和,即有:

$$\tilde{\Phi} = \Phi_{\text{ideal}} + E. \quad (12)$$

式(12)中“扰动”矩阵 E 由忽略的信道脉冲响应尾部、白色或有色加性信道噪声、计算 $\tilde{\Phi}$ 估值时产生的数值误差等 3 部分影响组成。显然,通过这样的处理,能有效克服基于 ITC 的宽带频谱感知方法对噪声及接收信号统计特征的依赖。另外,假设 E 小于 Φ_{ideal} 。设 $\tilde{\Phi}$ 的谱分解为

$$\tilde{\Phi} = \sum_{i=1}^Q \rho_i \tilde{u}_i \tilde{u}_i^H, \rho_1 \geq \rho_2 \geq \dots \geq \rho_Q. \quad (13)$$

令 φ_p 表示由 q 个最大特征值 $\rho_1 \geq \rho_2 \geq \dots \geq \rho_q$ 相应的特征向量张成的“估计”被占用信道子空间; φ_s 表示由其余的特征值 $\rho_{q+1} \geq \rho_{q+2} \geq \dots \geq \rho_Q$ 相应的特征向量张成的“估计”空闲信道子空间,显然这两个子空间彼此正交; φ_{ideal} 表示由矩阵 Φ_{ideal} 的列向量张成的 q 维子空间,即“理想”子空间。若用 φ_p 来近似“理想”子空间 φ_{ideal} , 引用 Φ_{ideal} 的秩等于 q 这一假设,可以导出扰动矩阵 E 的平方欧式范数的下界

$$\|E\|_2 \geq \rho_{q+1}. \quad (14)$$

由式(14)可知,未知的“理想”子空间 φ_{ideal} 和“估计”的被占用信道子空间 φ_p 通过一个范数大于等于特征值 ρ_{q+1} 的扰动矩阵 E 联系在一起。鉴于 E 远小于 Φ_{ideal} ,用 γ 表示具有最小范数的扰动矩阵,其平方欧式范数定义为:

$$\|\gamma\|_2 = \rho_{q+1}. \quad (15)$$

当 φ_p 对扰动 γ 不敏感时,可认为“估计”被占用信道子空间 φ_p 接近于“理想”子空间 φ_{ideal} ,否则认为这两个信号子空间是相互远离的。

3.2 基于秩准则的宽带频谱感知算法推导

由以上分析可知,当“估计”被占用信道子空间 φ_p 接近于“理想”子空间 φ_{ideal} 时,与子空间 φ_{ideal} 对应的理想矩阵 Φ_{ideal} 的秩即为宽带频谱感知中被占用信道数。从而将频谱感知中被占用信道数的确定转化为对理想矩阵 Φ_{ideal} 秩 q 的估计。该秩 q 使得与之有关的“估计”被占用信道子空间 φ_p 对满足式 $\|\gamma\|_2 = \rho_{q+1}$ 的扰动 γ 不敏感,此时该子空间 φ_p 所对应的矩阵可以表示为:

$$S = \sum_{i=1}^q \rho_i \tilde{u}_i \tilde{u}_i^H, \rho_1 \geq \rho_2 \geq \dots \geq \rho_q. \quad (16)$$

为得到 q 的最优估计值,首先引入一个新矩阵:

$$\Psi = \tilde{\Phi} + \gamma. \quad (17)$$

其谱分解式为:

$$\Psi = \sum_{i=1}^Q \bar{\rho}_i \bar{u}_i \bar{u}_i^H, \bar{\rho}_1 \geq \bar{\rho}_2 \geq \dots \geq \bar{\rho}_Q. \quad (18)$$

同时可以定义一个如下矩阵:

$$\bar{S} = \sum_{i=1}^q \bar{\rho}_i \bar{u}_i \bar{u}_i^H, \bar{\rho}_1 \geq \bar{\rho}_2 \geq \dots \geq \bar{\rho}_q. \quad (19)$$

对应的“扰动”被占用信道子空间为 $\bar{\varphi}_p$ 。

利用数值分析中常用的典型三角正弦的概念来表示测度 φ_p 和 $\bar{\varphi}_p$ 两个同维子空间之间的距离,则相应的距离测度为

$$\xi = \|\sin \angle(\varphi_p, \bar{\varphi}_p)\|^2. \quad (20)$$

式中: $\angle(\varphi_p, \bar{\varphi}_p)$ 表示两个子空间的夹角。文献[9]指出,距离测度 ξ 决定于扰动 γ 的大小,以及与“扰动”被占用信道子空间 $\bar{\varphi}_p$ 和“估计”空闲信道子空间 φ_s 有关的特征值之间的间隔。根据这一结论可以推导出:

$$\xi \leq \frac{\|\gamma\|_2 + \rho_{q+1} \xi}{\bar{\rho}_q}. \quad (21)$$

根据文献[12]中的特征值扰动结果 $\bar{\rho}_q \geq \rho_q - \rho_{q+1}$, 以及已定义的 $\|\gamma\|_2 = \rho_{q+1}$, 可以得到:

$$\xi \leq r(q) = \begin{cases} \frac{\rho_{q+1}}{\rho_q - 2\rho_{q+1}}, & \rho_{q+1} \leq \frac{\rho_q}{3}; \\ 1, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (22)$$

式(22)表明“估计”被占用信道子空间 φ_p 对扰动 γ 的敏感性,主要由“估计”被占用信道子空间 φ_p 的最小特征值 ρ_q 和“估计”空闲信道子空间 φ_s 最大特征值 ρ_{q+1} 之间的间隔决定.若 $r(q) \ll 1$,即 $\rho_{q+1} \ll \rho_q$,则“估计”被占用信道子空间 φ_p 对扰动 γ 不敏感,从而说明“估计”被占用信道子空间 φ_p 接近于“理想”子空间 φ_{ideal} .

进一步求解 $r(q)$ 的最小值,并获得最小值所对应的 \bar{q} 值为:

$$\bar{q} = \arg \min r(q). \tag{23}$$

该 \bar{q} 值为“理想”子空间 φ_{ideal} 所对应矩阵 Φ_{ideal} 的秩,也就是宽带频谱感知中被占用信道的个数.

3.3 基于秩准则的宽带频谱感知算法推导

比较式(7)(8)和(22)不难看出,相较于文献[7]和[8]所提的基于 ITC 理论的宽带频谱感知方法,本文所提的基于秩准则的宽带频谱感知方法所对应的感知判决量公式计算简单,实现复杂度更低.归纳起来,基于秩准则的宽带频谱感知方法的算法流程如下.

1)计算取样协方差矩阵:

$$\tilde{\Phi} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y(n)y(n)^H;$$

2)对 $\tilde{\Phi}$ 进行特征值分解: $\tilde{\Phi} = \sum_{i=1}^Q \rho_i \tilde{u}_i \tilde{u}_i^H$, 并得到 Q 个特征值 $\rho_1 \geq \rho_2 \geq \dots \geq \rho_Q$;

$$3) \text{利用函数 } \xi \leq r(q) = \begin{cases} \frac{\rho_{q+1}}{\rho_q - 2\rho_{q+1}}, & \rho_{q+1} \leq \frac{\rho_q}{3}, \\ 1, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

测度 φ_p 和 φ_s 两个同维子空间之间的距离,“估计”被占用信道子空间 φ_p 对扰动 γ 的敏感性;

4)采用 $\bar{q} = \arg \min r(q)$ 来估计被占用信道的数目;

5)选择 $\tilde{\Phi}$ 的对角线元素中最大的 \bar{q} 个元素,这 \bar{q} 个元素在矩阵 $\tilde{\Phi}$ 中所对应的列数值即为被估计出的被占用信道.

4 仿真实验及结果分析

仿真过程中假设待检测信道数 Q 为 40,其中 15 个信道被授权用户使用.分别采用文献[7]所提的基于 ITC 的 AIC 准则和 MDL 准则的两类宽带频谱感知算法和本文所提基于秩准则的算法,通过 10 000 次蒙特卡罗仿真实验,得到白噪声和色噪声场景下的检测概率 P_d 和虚警概率 P_f ,以此分析 3 种

算法在不同应用场景中的感知性能.上述 3 种算法的性能曲线在图中分别用 AIC,MDL 和 RANK 标识.依照文献[7]的仿真模型,这里假定在不同的被占用频带中授权用户信号的功率是不同的,表 1 给出了 15 个被占用信道的位置和相对功率.表中第 2 个信道的功率为参考功率,其他被占用信道的功率与该信道的功率成比例关系.

表 1 被占用信道的位置和相对功率
Tab. 1 Locations and relative power values of the occupied channels

位置	2	8	15	16	19	21	22	24
相对功率	1.00	3.82	2.15	2.79	3.75	3.78	3.54	1.36
位置	25	26	27	29	30	31	39	
相对功率	1.65	3.54	3.45	3.70	3.40	2.20	1.60	

4.1 白噪声场景下仿真实验及结果分析

从图 2—图 5 可以看出,在白噪声场景下,基于 AIC,基于 MDL 准则和本文所提基于 RANK 准则的宽带频谱感知算法都获得了较好的检测性能:当 $N=50$ 时,3 种算法分别在 SNR 大约为 -9 dB 和 -4 dB 处检测概率 P_d 达到了 100%;在 $N=100$ 时,基于 AIC 算法的检测概率 P_d 略优于基于 MDL 算法的检测概率,3 种算法的虚警概率 P_f 均接近于 0.从仿真结果来看,在白噪声场景下,当信噪比较低,样本数较小时,基于 ITC 的宽带频谱感知算法的检测性能优于本文所提基于 RANK 算法的检测性能,然而可以注意到随着信噪比的提高和样本数 N 的增大,所提新方法的感知性能提高显著,并且表现出比上述两种方法更低的计算复杂度.

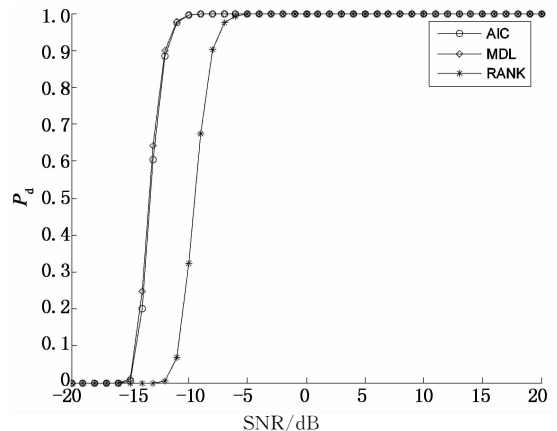


图 2 白噪声场景下的检测概率($N=50$)
Fig. 2 Probability of detection in white noise ($N=50$)

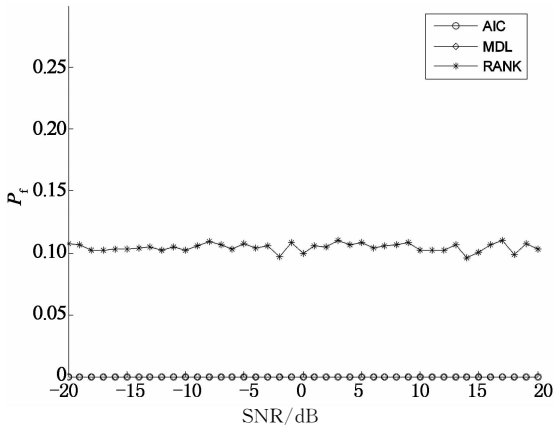


图 3 白噪声场景下的虚警概率 ($N=50$)

Fig. 3 Probability of false-alarm in white noise ($N=50$)

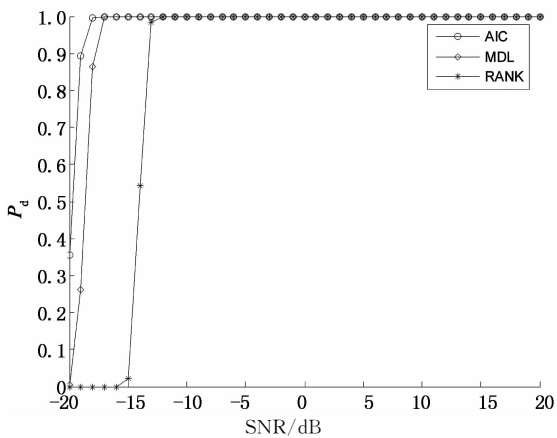


图 4 白噪声场景下的检测概率 ($N=100$)

Fig. 4 Probability of detection in white noise ($N=100$)

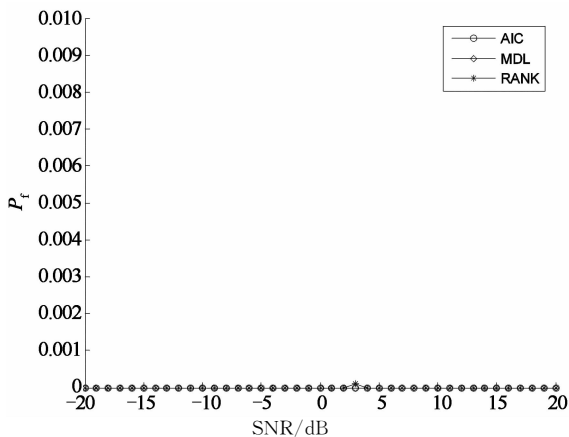


图 5 白噪声场景下的虚警概率 ($N=100$)

Fig. 5 Probability of false-alarm in white noise ($N=100$)

4.2 色噪声场景下仿真实验及结果分析

从图 6—图 8 中观察检测概率 P_d ，在色噪声场景下，随着样本数 N 的增大，3 种检测算法的检测性能均有较大提高。但与白噪声场景相比，则呈现出不同的仿真结果：其中，本文所提的基于 RANK 准则的宽带频谱感知算法其性能明显优于基于 ITC

的宽带频谱感知算法。基于 MDL 算法的检测性能优于 AIC 算法，且随着样本数 N 的增大，两者的差距越发明显。随着信噪比的增大，上述两类算法的 P_d 呈现了一种由大变小，又由小变大的变化趋势。

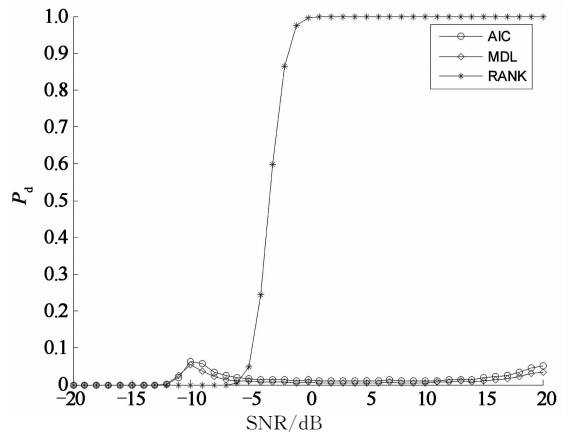


图 6 色噪声场景下的检测概率 ($N=50$)

Fig. 6 Probability of detection in colored noise ($N=50$)

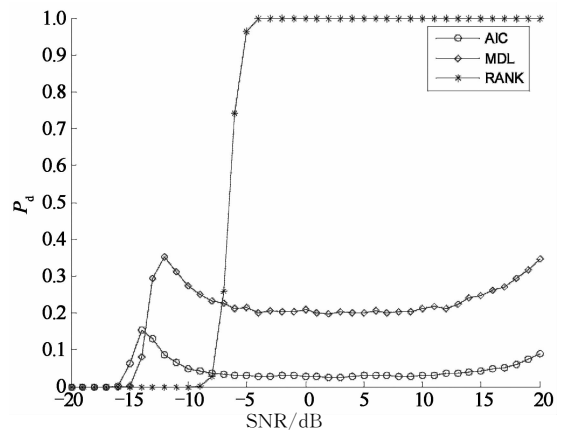


图 7 色噪声场景下的检测概率 ($N=100$)

Fig. 7 Probability of detection in colored noise ($N=100$)

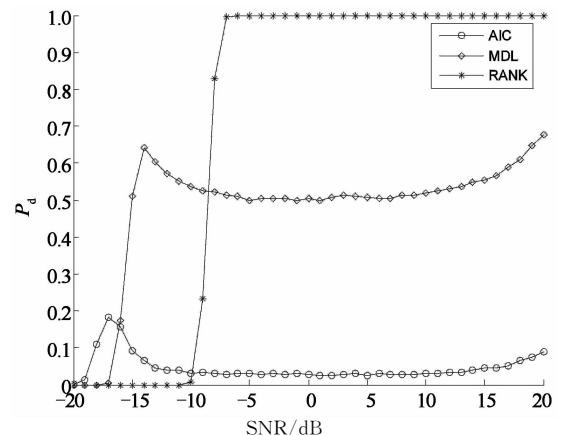


图 8 色噪声场景下的检测概率 ($N=200$)

Fig. 8 Probability of detection in colored noise ($N=200$)

从图 9—图 11 所示的虚警性能来看，在色噪声场景下，本文所提的基于 RANK 准则的宽带频谱感

知算法的虚警性能明显优于基于 ITC 的两类宽带频谱感知算法,这样新方法能够在色噪声场景下更好地保护次级用户的权利,能够为其提供更多使用空闲频谱的机会。

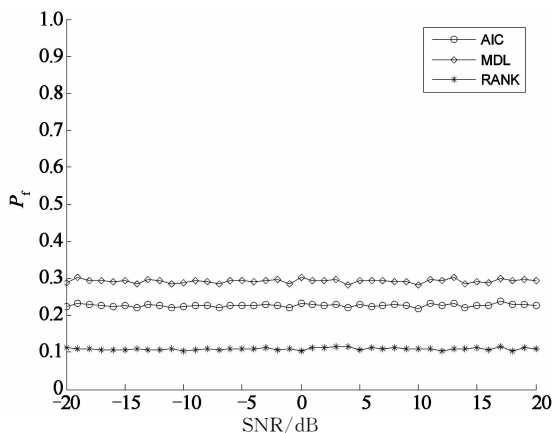


图9 色噪声场景下的虚警概率($N=50$)

Fig. 9 Probability of false-alarm in colored noise ($N=50$)

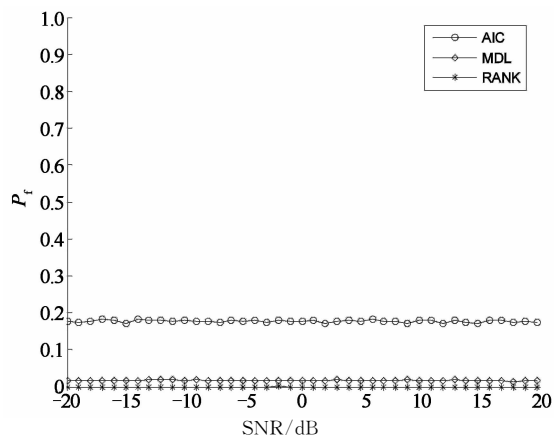


图10 色噪声场景下的虚警概率($N=100$)

Fig. 10 Probability of false-alarm in colored noise ($N=100$)

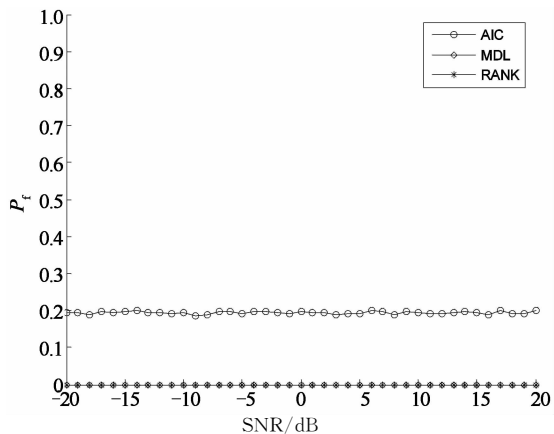


图11 色噪声场景下的虚警概率($N=500$)

Fig. 11 Probability of false-alarm in colored noise ($N=500$)

5 结论

为了克服基于信息论准则的宽带频谱感知方法的局限性,本文提出了一种基于秩准则的宽带盲频谱感知算法.该算法判决量计算简单,易于工程实现,并在噪声干扰下具有较好的鲁棒性,尤其是在色噪声场景中,基于秩准则的宽带频谱感知算法明显优于基于信息论准则的宽带频谱感知算法.此外,上述仿真结果表明,在色噪声感知场景中,基于信息论准则的 AIC 和 MDL 两类算法的检测性能对信噪比和估计中所用的数据样本数的变化表现敏感.这进一步说明本文所提基于秩准则的宽带频谱感知算法在感知性能的稳定性方面要优于基于信息论准则的宽带感知算法。

参考文献

- [1] YU R, ZHANG C, ZHANG X, *et al.* Hybrid spectrum access in cognitive radio based smart-grid communications systems[J]. IEEE Systems Journal, 2014, 8(2): 577–587.
- [2] MING J, YOU M L, HEUNG G R. On the performance of covariance based spectrum sensing for cognitive radio [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(7): 3670–3682.
- [3] ZENG Y H, LIANG Y C, HOANG A T, *et al.* A review on spectrum sensing for cognitive radio: challenges and solutions [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2010(1): 1–15.
- [4] GOKCEOGLU A, DIKMESE S, VALKAMA M, *et al.* Energy detection under IQ imbalance with single-and multi-channel direct-conversion receiver: analysis and mitigation [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(3): 411–424.
- [5] EL-KHAMY S E, EL-MAHALLAWY M S, YOUSSEF E S. Improved wideband spectrum sensing techniques using wavelet-based edge detection for cognitive radio [C] // Proceedings of 2013 International Conference on Computing, Networking and Communications. San Diego, CA: IEEE Computer Society, 2013: 418–423.
- [6] SANNA M, MURRONI M. Optimization of non-convex multiband cooperative sensing with genetic algorithms [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2011, 5(1): 87–96.
- [7] LIU S, SHEN J, ZHANG R, *et al.* Information theoretic criterion-based spectrum sensing for cognitive radio [J]. IET Communications, 2008, 2(6): 753–762.
- [8] 申滨, 王舒, 黄琼, 等. 基于 Gerschgorin 圆盘理论的认知无线电宽带频谱感知[J]. 通信学报, 2014, 35(4): 1–10.
SHEN Bin, WANG Shu, HUANG Qiong, *et al.* Gerschgorin disk theorem based spectrum sensing for wideband cognitive radio [J]. Journal on Communications, 2014, 35(4): 1–10. (In Chinese)
- [9] LIAVAS A P, REGALIA P A, DELMAS J P. Blind channel approximation: effective channel order determination [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, 47(12): 3336–3344.
- [10] HSIEN T W, JAR F Y, FWU K C. Source number estimators using transformed gerschgorin radii [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(6): 1325–1333.
- [11] YANG X, PENG S L, LEI K J, *et al.* Impact of the dimension of the observation space on the decision thresholds for GLRT detectors in spectrum sensing [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2012, 1(4): 396–399.
- [12] WEDIN P A. Perturbation bounds in connection with singular value decomposition [J]. BIT, 1972, 12: 99–111.